

Lecciones Aprendidas



De los participantes de Natural Gas STAR

REEMPLAZO DE SELLOS HÚMEDOS POR SELLOS SECOS EN COMPRESORES CENTRÍFUGOS (Replacing Wet Seals with Dry Seals in Centrifugal Compressors)

Resumen gerencial

Los compresores centrífugos son ampliamente usados en la producción y transmisión de gas natural. Los sellos en los ejes rotativos evitan que el gas natural a alta presión se escape de la envoltura cilíndrica del compresor. Tradicionalmente, estos sellos usan aceite a alta presión como barrera contra el escape del gas. Los participantes de Natural Gas STAR han descubierto que reemplazar estos sellos “húmedos” (aceite) por sellos secos reduce importantemente los costos de operación y las emisiones de metano.

Las emisiones de metano de los sellos húmedos fluctúan generalmente de 40 a 200 pies cúbicos estándar por minuto (scfm). La mayoría de esas emisiones ocurren cuando al aceite circulante se le quita el gas que absorbe en la cara del sello de alta presión. Los sellos secos, los cuales usan gas a alta presión para sellar el compresor, emiten menos metano (hasta a 6 scfm), tienen requisitos más bajos de energía, mejoran la eficiencia operativa y el rendimiento del compresor y la tubería, mejoran la confiabilidad del compresor y necesitan mucho menos mantenimiento.

Aunque las conversiones a sellos secos podrían no ser posibles en algunos compresores debido al diseño de la envoltura o los requisitos operativos, los participantes deben seleccionar sellos secos antes que sellos húmedos siempre que reemplacen o instalen compresores centrífugos cuando sea posible. Un sello seco puede ahorrar aproximadamente \$135,000 al año y pagarse a sí mismo hasta en 14 meses. Por ejemplo, un participante de Natural Gas STAR el cual instaló un sello seco en un compresor existente, redujo las emisiones en un 97 por ciento, de 75 a 2 Mcf al día, lo que ahorró \$80,000 al año solamente en gas.

Fuente de emisiones	Volumen anual de pérdida de gas (Mcf)	Método para reducir la pérdida de gas	Valor del gas ahorrado (\$/año)	Costo de la implementación (\$/año)	Plazo de recuperación de la inversión
Sellos húmedos de aceite	45,120 ¹	Instalación de sellos secos	240,000	135,360 ²	14 meses ³

¹ Basado en la diferencia entre las tasas de ventilación típicas de los sellos húmedos y secos (por ejemplo, 100 scfm contra 6 scfm) en un compresor tipo “palanca” operando a 8,000 horas/año.

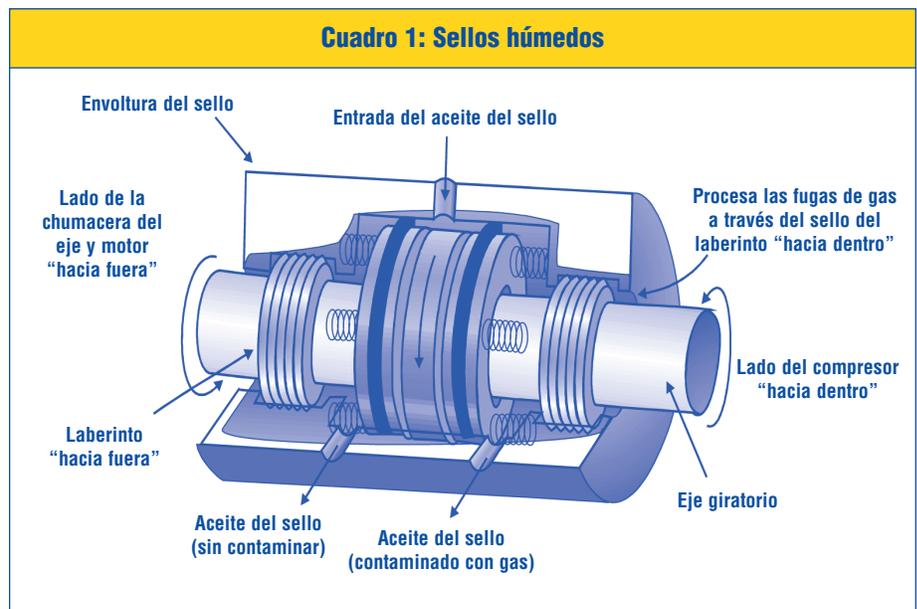
² Valor del gas = \$3.00/Mcf.

³ Basado en el reemplazo de un sello húmedo completamente funcional con \$73,000 en reducciones adicionales de costo de operación y mantenimiento.

Antecedentes tecnológicos

Sellos húmedos

Los compresores centrífugos requieren sellos alrededor del eje rotativo para evitar que los gases se escapen en donde el eje sale de la envoltura cilíndrica del compresor. El tipo más común de “palanca” de compresores tiene dos sellos, uno en cada extremo del compresor, mientras que los compresores “en voladizo” tienen sólo un sello “hacia dentro” en el lado (motor). Como se muestra en el Cuadro 1, estos sellos usan aceite, el cual circula bajo alta presión entre tres anillos alrededor del eje del compresor, formando una barrera contra las fugas de gas comprimido. El anillo central está sujeto al eje rotativo, mientras que los dos anillos en cada extremo son estacionarios en la envoltura del sello, colocados contra una película fina de aceite entre los anillos para lubricar y actuar como barrera contra fugas. Los arosellos de hule evitan las fugas alrededor de los anillos estacionarios. Muy poco gas escapa a través de la barrera de aceite; se absorbe mucho más gas en el aceite bajo presión alta en la interfaz de aceite/gas del sello del lado “hacia dentro” (lado del compresor), por lo que contamina el aceite del sello. El aceite del sello se purga del gas absorbido (usando calentadores, tanques de evaporación y técnicas de desgasificación) y se recircula. El metano recuperado comúnmente se ventila a la atmósfera.

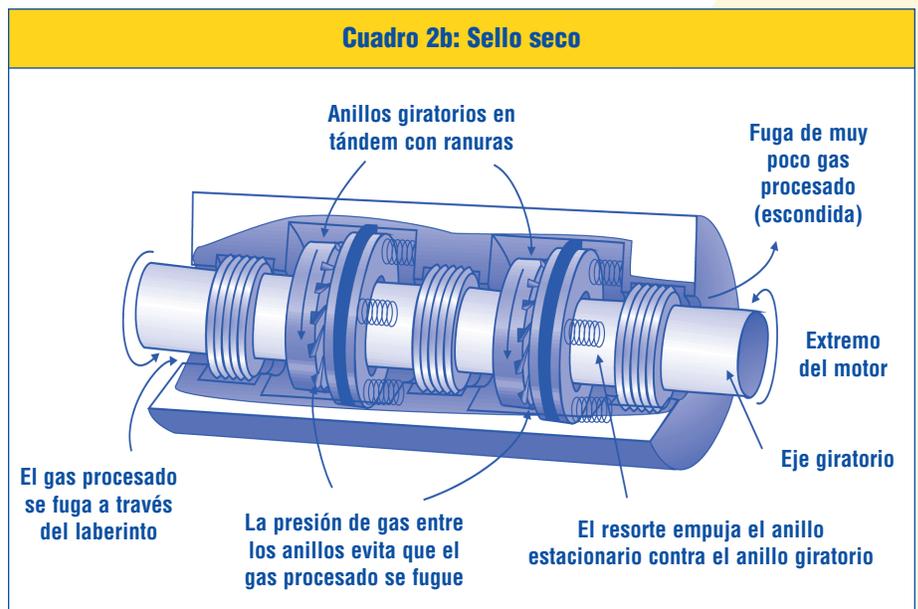
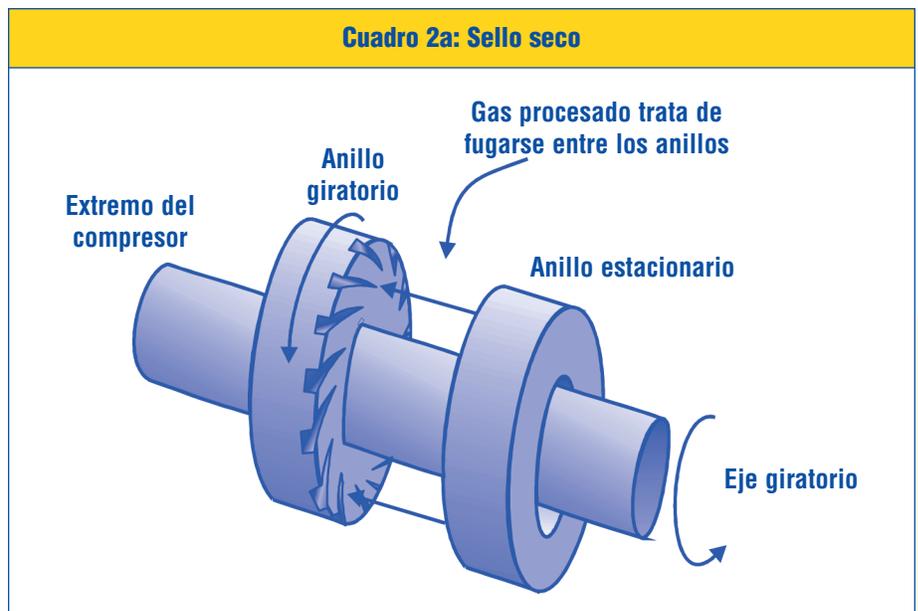


Sellos secos

Una alternativa al sistema tradicional de sellos húmedos (aceite) es el sistema de sellos secos mecánicos. Este sistema de sello no usa ningún aceite circulante de sellado. Los sellos secos operan mecánicamente bajo la fuerza opuesta creada por las ranuras hidrodinámicas y la presión estática.

Como se muestra en los Cuadros 2a y 2b, las ranuras hidrodinámicas están grabadas en la superficie del anillo giratorio sujeto al eje del compresor. Cuando el compresor no está girando, el anillo estacionario en la envoltura del sello está presionado contra el anillo rotatorio por medio de resortes. Cuando el eje del compresor gira a alta velocidad, el gas comprimido tiene solo un camino para fugarse por el eje, y eso es entre los anillos giratorios y los estacionarios. Este gas se bombea entre los anillos mediante ranuras en el anillo giratorio.

La fuerza opuesta de gas a alta presión que se bombea entre los anillos y los resortes tratando de empujar los anillos entre sí, crea un espacio demasiado delgado entre los anillos a través del cual puede fugarse un poco de gas. Mientras el compresor está funcionando, los anillos no están en contacto entre sí, y por lo tanto, no se desgastan ni necesitan lubricación. Los arosellos sellan los anillos estacionarios en la caja del sello.



Beneficios económicos y para el medio ambiente

Colocar uno o más de estos sellos secos juntos en series, como se muestra en el Cuadro 2b, se llama, “sellos secos en tándem”, y es muy eficaz para reducir las fugas de gas. Este tipo de sello tiene menos de uno por ciento de las fugas de un sistema de sello húmedo ventilado a la atmósfera y mucho menor costo de operación.

Los sellos secos de gas reducen significativamente las emisiones de metano. A la vez, reducen significativamente el costo de operación y mejoran la eficacia del compresor. Los beneficios económicos y ambientales de los sellos secos incluyen:

- ★ **Tasas de fuga de gas.** Durante la operación normal, los sellos secos fugan a una tasa de 0.5 a 3 scfm a través de cada sello, dependiendo del tamaño del sello y la presión de funcionamiento. Mientras esto es equivalente a la tasa de fuga del sello húmedo en la cara del sello, los sellos húmedos generan emisiones adicionales durante la desgasificación del aceite circulante. El gas del aceite generalmente se ventila a la atmósfera, lo que lleva a la tasa total de fugas por los sellos húmedos dobles a entre 40 a 200 scfm, dependiendo del tamaño y la presión del compresor.
- ★ **Más simple mecánicamente.** Los sistemas de sellos secos no requieren componentes de circulación de aceite elaborados ni instalaciones de tratamiento.
- ★ **Consumo reducido de energía.** Debido a que los sellos secos no tienen bombas ni sistemas de circulación accesoria de aceite, evitan las pérdidas de energía del equipo “parásito”. Los sistemas húmedos requieren de 50 a 100 kW por hora, mientras que los sistemas de sellos secos necesitan aproximadamente 5 kW de energía por hora.
- ★ **Más confiabilidad.** El porcentaje más alto de tiempo fuera de servicio para un compresor que usa sellos húmedos se debe a problemas con los sistemas de sellos. Los sellos secos tienen menos componentes auxiliares, lo que hace que sean más confiables en general y se tenga menos tiempo con el compresor fuera de servicio.
- ★ **Menor mantenimiento.** Los sistemas de sellos secos tienen un costo menor de mantenimiento que los sellos húmedos porque no tienen piezas móviles relacionadas con la circulación de aceite (por ejemplo, las bombas, las válvulas de control, las válvulas de alivio).
- ★ **Eliminación de las fugas de aceite de los sellos húmedos.** Al sustituir los sellos secos con sellos húmedos se elimina la fuga de aceite a la tubería, por lo tanto se evita la contaminación del gas y la degradación de la tubería.

Proceso de decisión

Los participantes generalmente enfrentan una de tres situaciones cuando consideran la instalación de sellos secos: reemplazan el compresor entero; reemplazan un sello húmedo desgastado en un compresor existente; o reemplazan un sello húmedo completamente funcional en el compresor existente. Aproximadamente el 90 por ciento de todos los compresores nuevos vienen con sellos secos. Cuando se compra un compresor nuevo, los participantes deben asegurarse de que tenga el sello seco.

El análisis para reemplazar un sello húmedo de un compresor existente debe considerar el ahorro de las emisiones de metano junto con los costos de capital y operativos y los beneficios. Los aspectos económicos del reemplazo de sellos húmedos operativos son convincentes, y siempre que sea posible, los participantes deben realizar dichos reemplazos. El proceso de decisión siguiente es una directriz para determinar los candidatos, beneficios y el costo de reemplazar los sellos húmedos con sellos secos en los compresores.

Cuatro pasos para la conversión a sellos secos:

1. Identificación de los candidatos para el reemplazo de los sellos húmedos.
2. Cálculo de los ahorros de la reconversión del sello seco.
3. Determinación del costo de la conversión de los sellos secos.
4. Comparación del costo de los ahorros.

Paso 1: Identificación de los candidatos para el reemplazo de los sellos húmedos. Los operadores deben hacer un inventario general y una evaluación técnica de los compresores existentes. Los factores a considerar incluyen el tipo de compresor, la edad, el hardware y las condiciones operativas. Todos los compresores con sellos húmedos deben identificarse y evaluarse para el cambio a sellos secos. Cuando se decida qué compresores son candidatos para reemplazo de los sellos húmedos, considere lo siguiente:

- ★ Los sellos secos deben usarse en los compresores de hasta 3,000 psi de manera segura; las aplicaciones de 1,500 psi son de rutina. Sin embargo, los sellos secos podrían no ser seguros en presiones altas. Aun más, los sellos secos no son apropiados para las aplicaciones con temperaturas por encima de 300 a 400 grados Fahrenheit (debido a las limitaciones del material de los arosellos)¹. El diseño de algunos compresores prohíbe la reconversión de los sellos secos.
- ★ Algunos compresores antiguos pueden estar al final de su vida útil y por lo tanto, serán candidatos para reemplazo completo en lugar del reemplazo del sello. Esto generalmente se determina mientras se planea una reparación general importante, cuando el costo de operación y mantenimiento del compresor viejo está proyectado para aumentar a un nivel mucho mayor que el costo de operación y mantenimiento de una unidad nueva. Algunas pistas de haber llegado a esta fase incluyen el aumento repentino de la frecuencia y magnitud de mantenimiento sin programar y la falta de disponibilidad de piezas de repuesto o la falta de apoyo técnico.

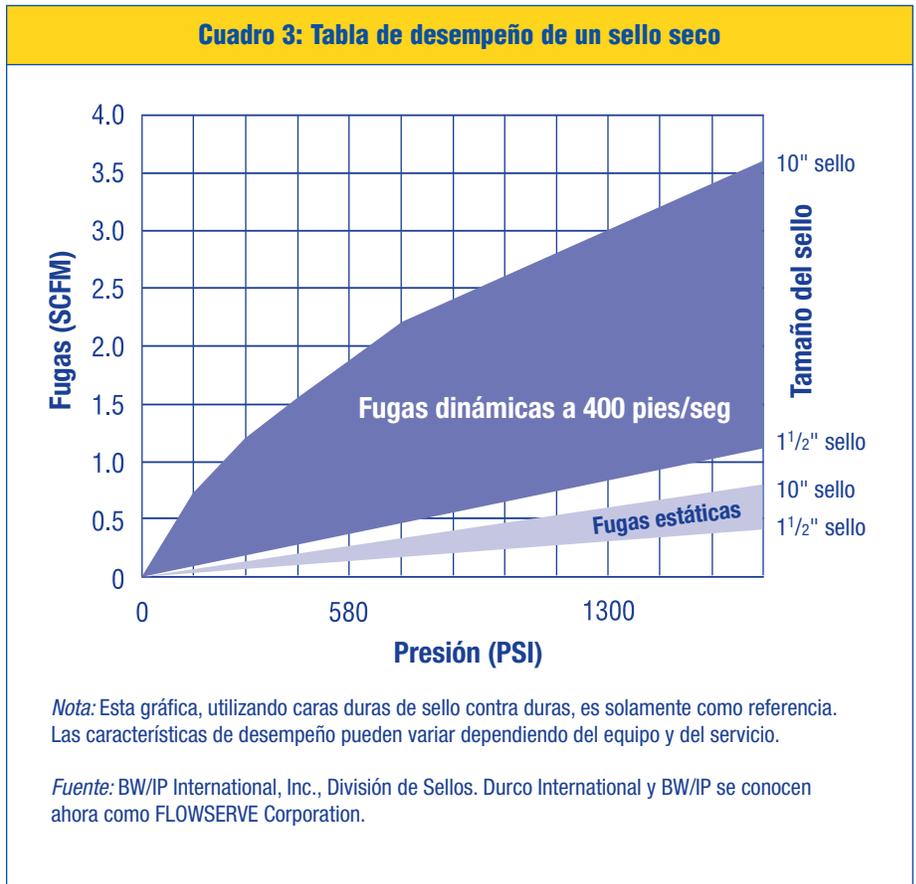
Los compresores centrífugos que cumplen con los criterios del Paso 1 deben evaluarse más ampliamente del modo siguiente.

Paso 2: Cálculo de los ahorros de la reconversión del sello seco. En general, la mayoría de los ahorros al reemplazar el sello húmedo con uno seco pueden atribuirse a las reducciones en la pérdida de gas metano. Para calcular estos ahorros, los participantes pueden medir la mayoría de la pérdida de metano de sus compresores con sellos húmedos en la ventila de la unidad de desgasificación de aceite del sello embolsándolo o usando un muestreador de flujo alto.

¹John Stahley, Dresser-Rand Co.

En la cara del sello también escapa algo de gas, pero es más difícil medir cantidades menores de 10 por ciento de emisiones de la unidad desgasificadora de aceite del sello. Las fugas típicas de los sellos de gas húmedo fluctúan de 40 a 200 scfm del compresor tipo palanca.

En comparación, las pérdidas esperadas de los sellos secos pueden verse en el Cuadro 3, una tabla de desempeño provista por un vendedor de sellos secos. Esta tabla muestra un ejemplo de un sello tipo tándem con tasas de fuga que fluctúan entre 0.5 a 3 scfm para ejes de compresores de 1.5 a 10 pulgadas, para compresores operando a 580 a 1,300 psig de presión. El reemplazo de sellos húmedos con dos sellos secos en tándem puede reducir las emisiones entre 34 a 194 scfm. Esto es equivalente a 16,320 a 93,120 Mcf por 8,000 horas al año, con un ahorro total anual de \$48,960 a \$279,360.



Este proceso se aplica a todos los diseños de compresores. Los compresores menos comunes en voladizo tienen un sello individual, y cambiar de sello húmedo a sello seco rendiría la mitad de los ahorros de hacer lo mismo con un compresor de tipo de palanca.

Aparte de los ahorros de gas, los sellos secos también rinden ahorros significativos de operación y mantenimiento en comparación con los sellos húmedos. Los costos anuales de operación y mantenimiento fluctúan ampliamente, entre \$6,000 y \$10,000 al año. Los costos de operación y mantenimiento de los sellos húmedos pueden llegar hasta a \$100,000 al año. Los cálculos detallados de las diferencias en el costo de operación y mantenimiento entre los sellos secos y húmedos están bien documentados (vea Uptigrove et al, 1987). El Cuadro 4 resume estos cálculos de un compresor con un diámetro de eje de 7.5 pulgadas, operando 8,000 horas al año.

Cuadro 4: Costos anuales de operación y mantenimiento de un sello seco por compresor¹
1. Reducción de las pérdidas de potencia del sello = \$13,900
2. Reducción de las pérdidas de ventilador/bomba de aceite = \$4,000
3. Aumento de la eficiencia del flujo de la tubería = \$26,600
4. Reducción de la pérdida de aceite = \$3,500
5. Reducción del tiempo fuera de servicio de operación y mantenimiento = \$15,000
AHORROS TOTALES = \$63,000
¹ S.O. Uptigrove et al.

Los factores específicos del lugar que se usaron en los cálculos incluyen: (1) pérdidas arrastradas de los sellos húmedos y secos, (2) caballos de fuerza del ventilador de enfriamiento y la bomba de aceite del sello, (3) caballos de fuerza del compresor, (4) consumo de aceite del sello, y (5) costos de mantenimientos programados y emergencias anuales.

Paso 3: Determinación del costo de la conversión de los sellos secos. El costo de un sistema de sellos secos dependerá de la presión operativa del compresor, el tamaño del eje, la velocidad de rotación y otros factores específicos de instalación. El costo del sello generalmente fluctúa entre \$5,000 y \$6,000 por pulgada del diámetro del eje para los sellos húmedos y \$8,000 a \$10,000 por pulgada por los sellos secos en tándem. Estos costos se duplicarán en los compresores tipo de palanca (dos sellos).

Otros costos incluyen la ingeniería, la instalación y el equipo auxiliar. Los sellos secos requieren una consola de gas, una unidad de filtrado, controles e instrumentos de vigilancia, mientras que los sellos húmedos requieren bombas de aceite de sello, ventiladores de enfriamiento, unidades de desgasificación y controles. Dependiendo de la ubicación, el tipo de equipo, el número de controles y la disponibilidad de los componentes, el costo fluctúa de \$30,000 a \$100,000 por sellos secos, y hasta \$200,000 por sellos húmedos. Estos costos de instalaciones auxiliares son los mismos para ambos, los tipos de compresor de sello sencillo y de sello doble.

Paso 4: Comparación del costo de los ahorros. Una simple comparación de costo entre el convertir un compresor a sellos secos y reemplazar los sellos húmedos existentes con componentes nuevos mostrarán ahorros sustanciales durante un período de cinco años. El Cuadro 5 muestra un ejemplo de un compresor tipo de palanca con un eje de 6 pulgadas operando 8,000 horas al año usando los costos de los Pasos 2 y 3.

Cuadro 5: Comparación de costo del reemplazo de sellos de un compresor tipo de palanca con eje de 6 pulgadas

Categoría de costo	Sello seco (\$)	Sello húmedo (\$)
Costo de implementación¹		
Costo de sellos (2 secos @ \$10,000/eje-pulg., c/pruebas)	120,000	
Costo de sellos (2 húmedos @ \$5,000/eje-pulg.)		60,000
Otros costos (ingeniería, instalación de equipo)	120,000	0 ²
Costos totales de implementación	240,000	60,000
Operación y mantenimiento anual ³	10,000	73,000
Emisiones anuales de metano ⁴ (@ \$3.00/Mcf; 8,000 horas/año)		
2 sellos secos a un total de 6 scfm	8,640	
2 sellos húmedos a un total de 100 scfm		144,000
Costo total durante un período de 5 años (\$):	333,200	1,145,000
Ahorros totales de sellos secos durante 5 años:		
Ahorros (\$)	818,000	
Reducciones de emisiones de metano (Mcf) (a 45,120 Mcf/año)	225,600	
<p>1. Flowserve Corporation. 2. Reutilización de circulación de aceite de sellos, desgasificación y equipo de control. 3. Del Cuadro 4; supone el mismo costo de operación y mantenimiento que el eje de 7.5 pulgadas. 4. De acuerdo con las tasas típicas de ventilación.</p>		

En este ejemplo, los costos de implementación de la conversión a sellos secos incluyen el costo de los sellos y el acondicionamiento del gas seco, la vigilancia y la consola de control. En los sellos húmedos, la circulación del aceite de sellos, la desgasificación y las instalaciones auxiliares de enfriamiento se reutilizan, de modo que solamente se incurre en el costo del reemplazo del sello.

Ahorros calculados

Otra manera de ilustrar los aspectos económicos de esta práctica es mediante una tabla de flujo de efectivo de cinco años. Este análisis toma en cuenta los costos de capital, el ahorro de las emisiones de metano, los costos de operación y mantenimiento, y asigna un valor de rescate al sistema de sello húmedo. Es importante notar que todos los análisis serán altamente específicos a sus lugares, pero los aspectos económicos de la reconversión de sellos secos son tan atractivas que las compañías deben considerar reemplazar todos los sellos húmedos, sin importar la edad. El Cuadro 6a presenta los aspectos económicos del reemplazo de un sistema de sello húmedo completamente funcional por un sistema de sello seco.

Cuadro 6A: Aspectos económicos del reemplazo de un sistema de sello húmedo completamente funcional por un nuevo sistema de sello seco

La reconversión de los sellos de gas secos en un compresor tipo de “palanca”, eje de 6 pulgadas, operando 8,000 horas al año, con sellos húmedos completamente funcionales.

Costo y ahorros (\$)	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Costos de capital y instalación de sello secos	(240,000)					
Ahorros anuales de emisiones de metano ¹		135,360	135,360	135,360	135,360	135,360
Costo anual de operación y mantenimiento del sello seco		(10,000)	(10,000)	(10,000)	(10,000)	(10,000)
Valor de rescate de los sellos húmedos	20,000					
Costo evitado de operación y mantenimiento del sello húmedo		73,000	73,000	73,000	73,000	73,000
Total anual	(220,000)	198,360	198,360	198,360	198,360	198,360
<p>NPV (Valor neto presente)² = \$531,940 IRR (Tasa interna de rendimiento) = 86% Plazo de recuperación de la inversión³ = 14 meses</p>						
<p>1. Los ahorros anuales representan la diferencia de la pérdida de gas metano entre los sellos secos nuevos y los reemplazados húmedos, a \$3.00/Mcf. 2. El valor neto presente está basado en 10% de descuento durante cinco años. 3. El plazo de recuperación de la inversión fluctúa entre 8 y 24 meses para las tasas de fugas de sellos húmedos entre 200 y 40 scfm.</p>						

El Cuadro 6B muestra los aspectos económicos de reemplazar el viejo sello húmedo al final de su vida útil: el valor de rescate es cero y el costo anual de operación y mantenimiento del sistema de sello húmedo aumenta (en este ejemplo, a \$100,000 al año). Estos dos ejemplos demuestran que reemplazar un sello húmedo con un sello seco puede ser económico independientemente de la edad o condición del sistema de sello húmedo.

Cuadro 6B: Aspectos económicos del reemplazo de un sistema de sello húmedo envejeciente por un nuevo sistema de sello seco

La reconversión de los sellos secos de gas en un compresor tipo de “palanca”, eje de 6 pulgadas, operando 8,000 horas al año, con sellos húmedos que necesitan reemplazarse.

Costo y ahorros (\$)	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Costos de capital & instalación de sellos secos	(240,000)					
Ahorros anuales de emisiones de metano ¹		135,360	135,360	135,360	135,360	135,360
Costo anual de operación y mantenimiento del sello seco		(10,000)	(10,000)	(10,000)	(10,000)	(10,000)
Valor de rescate de los sellos húmedos	0					
Costo evitado de operación y mantenimiento del sello húmedo		100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
Total anual	(240,000)	225,360	225,360	225,360	225,360	225,360
<p>NPV (Valor neto presente)² = \$614,292 IRR (Tasa interna de rendimiento) = 90% Plazo de recuperación de la inversión³ = 13 meses</p>						
<p>1. Los ahorros anuales representan la diferencia de la pérdida de gas metano entre los sellos secos nuevos y los reemplazados húmedos, a \$3.00/Mcf. 2. El valor neto presente está basado en 10% de descuento durante cinco años. 3. El plazo de recuperación de la inversión fluctúa entre 8 y 21 meses para las tasas de fugas de sellos húmedos entre 200 y 40 scfm.</p>						

Lecciones aprendidas

Los participantes pueden lograr significativos ahorros de costo y reducciones de emisiones al convertir el sistema a la tecnología de sellos secos. Los participantes ofrecen las siguientes lecciones aprendidas cuando se cambia a sellos secos:

- ★ Los sellos secos están considerados más seguros para funcionar que los sellos húmedos, debido a que eliminan la necesidad de tener un sistema de aceite a alta presión.
- ★ Para hacer el cambio a sellos secos de la manera más eficaz, programe la conversión durante un período normal fuera de servicio para evitar las interrupciones operativas.
- ★ Cuando se determinen los beneficios del reemplazo de sellos, los participantes deben tomar en cuenta que los sellos bien instalados y mantenidos pueden durar más del doble que los sellos húmedos.
- ★ Si el sello húmedo está cerca del final de su vida útil, un análisis sencillo de costo entre los sistemas nuevos de sellos se inclinará hacia los sellos secos. Incluso si al sello húmedo existente le queda una vida útil sustancial, las características operativas de los sellos secos ofrecerán ahorros significativos y podrían justificar el reemplazo temprano.
- ★ Dadas las claras ventajas económicas de los sellos secos, éstos deben instalarse siempre que sea posible técnicamente.
- ★ Noventa por ciento de todos los compresores nuevos ahora tienen sistemas de sellos secos de gas. Los sellos secos deben ser la tecnología elegida para todos los compresores nuevos.
- ★ Después de reemplazar los sellos húmedos con sellos secos, registre las reducciones de emisiones en los informes anuales que presente como parte del Programa Natural Gas STAR.

Nota: La información de costo provista en este documento se basa en cálculos para Estados Unidos. Los costos de equipo, mano de obra y el valor del gas variarán dependiendo del lugar, y podrían ser mayores o menores que en los Estados Unidos. La información sobre costo presentada en este documento solamente debe usarse como guía al determinar si las tecnologías y las prácticas son convenientes económicamente para sus operaciones.

References

Canadian Association of Petroleum Producers. *Options for Reducing Methane and VOC Emissions from Upstream Oil and Gas Operations*. Diciembre de 1993.

Henderson, Carolyn. U.S. EPA Natural Gas STAR Program. Contacto personal.

Hesje, R.C. and R.A. Peterson. *Mechanical Dry Seal Applied to Pipeline (Natural Gas) Centrifugal Compressors*. American Society of Mechanical Engineering. Gas Turbine Conference and Exhibition. Junio de 1984.

Kennedy, J.L. *Oil and Gas Pipeline Fundamentals*, Second Edition. PennWell Books. 1993.

Klosek, Marty. Flowserve Corporation. Bridgeport, New Jersey. Contacto personal.

Ronsky, N. Daryl; Harris, T.A.; Conquergood, C. Peter; and Davies, I. *An Effective System for Sealing Toxic Gases in Centrifugal Compressors*. American Society of Mechanical Engineers Gas Turbine Conference and Exhibition. Junio de 1987.

Sears, John. Contacto personal.

Stahley, John. Dresser-Rand Company. Olean, New York. Contacto personal.

Tingley, Kevin. U.S. EPA Natural Gas STAR Program. Contacto personal.

Uptigrove, S.O.; Harris, T.A.; and Holzner, D.O. *Economic Justification of Magnetic Bearings and Mechanical Dry Seals for Centrifugal Compressors*. American Society of Mechanical Engineers Gas Turbine Conference and Exhibition. Junio de 1987.



Agencia de Protección del Medio
Ambiente de los Estados Unidos
Aire y Radiación (6202J)
1200 Pennsylvania Ave., NW
Washington, DC 20460

EPA430-B-03-012S
Noviembre de 2003